



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis de estabilidad de un deslizamiento superficial en Cercs

Treball realitzat per:

Carlos Pernía Sánchez

Dirigit per:

Marcel Hürlimann

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 14 de Juny de 2015

Departament d'Enginyeria del Terreny

TREBALL FINAL DE GRAU

Contenido

Resumen.....	2
1. Introducción	3
2. Conceptos básicos	4
3. Metodología	13
3. 1 Recopilación de datos	13
3. 2 Trabajo de campo	14
3.3 Cálculo de la estabilidad	15
4. Resultados	16
4. 1 Descripción del deslizamiento	16
4.1.1 Sistema de auscultación	18
4.1.2 Materiales afectados y criterios de resistencia	22
4.2 Trabajo de campo	27
4.3 Análisis de la estabilidad.....	34
4.3.1 Definición de los valores y forma del nivel freático	36
4.3.2 Análisis de sensibilidad	40
5. Conclusiones	45
6. Bibliografía	46

Resumen

El presente trabajo final de grado tiene el objetivo de aplicar los conocimientos aprendidos en la ETSECCPB sobre mecánica de suelos, ingeniería geológica y geotecnia, en un caso práctico. Concretamente se estudia la estabilidad de un deslizamiento superficial con una superficie de rotura preexistente en la localidad de Cercs, en la comarca del Berguedà, en Catalunya. A partir de los datos proporcionados por un sistema de auscultación y un trabajo de campo se realiza un análisis de sensibilidad mediante el programa SLIDE de Rocscience, lo que nos aporta información sobre las propiedades resistentes del deslizamiento y las condiciones críticas en las que este se podría reactivar.

1. Introducción

En el año 1961 bajo el Monte Toc, 100km al norte de Venecia se construyó la presa de la Vajont. En la época, era una de las presas más altas del mundo con 262 metros de altura, 27 metros de grosor en la base.

Inicialmente se creyó que se conocía suficientemente la geología del terreno sobre el que se había construido la presa, al igual que los deslizamientos ya preexistentes. No obstante, durante el proceso de llenado en el 4 de noviembre del 1960 se identificaron algunos cambios en la roca y se produjo un deslizamiento de unos 700.000 m³ de rocas. Algunos datos e información relacionados con este episodio fueron ocultados con el fin de seguir adelante con el proyecto original.

Posteriormente el 9 de octubre de 1963 durante el proceso de tercer relleno de la presa se produjo un gigantesco deslizamiento de unos 260 millones de metros cúbicos de bosque, tierra y roca, que cayeron a unos 110 km por hora. El agua desplazada resultante produjo que 50 millones de metros cúbicos de agua sobrepasaran la presa en una ola de 90 metros de altura.

Como resultado de esta catástrofe murieron 1450 personas y las localidades de Longarone, Rivalta, Pirago, Villanova y Faè quedaron completamente destruidas. Fuente: Wikipedia. Presa de la Vajont

El objeto de este Trabajo Final de Grado es profundizar en el estudio de los deslizamientos y sus comportamientos, con tal de mejorar el conocimiento sobre las condiciones críticas que puedan causar roturas en formaciones superficiales y así en un futuro, contribuir a evitar catástrofes como la de la presa de la Vajont.

2. Conceptos básicos

¿Qué es un deslizamiento?

Un deslizamiento es un tipo de movimiento de masa causado por la inestabilidad de un talud. Se basa en el movimiento relativo de una masa inestable que se desliza a lo largo de una zona estable, a través de lo que se conoce como una superficie de rotura. Desde el punto de vista de la mecánica de suelos y según la ley de resistencia de Mohr-Coulomb, los deslizamientos se producen cuando en todos los puntos de esta superficie de rotura se alcanza la tensión tangencial máxima. Los deslizamientos se incluyen dentro de los movimientos de la geodinámica externa, que es una de las principales causantes de los cambios en la morfología terrestre. Fuente: Wikipedia.

Partes de un deslizamiento

De forma genérica se pueden distinguir las siguientes partes en un deslizamiento:

Corona: es la parte de la ladera que no ha fallado y se encuentra a mayor cota que el deslizamiento

Escarpe principal: es una superficie de pendiente muy fuerte, se encuentra en el límite superior del deslizamiento. Se produce por el movimiento diferencial entre el material desplazado y el material que no ha fallado.

Cabeza: es la parte superior del material desplazado a lo largo de su contacto con el escarpe principal.

Tope: el punto más alto de contacto entre el material desplazado y el escarpe principal

Punta: el punto en el pie más distante del tope del deslizamiento.

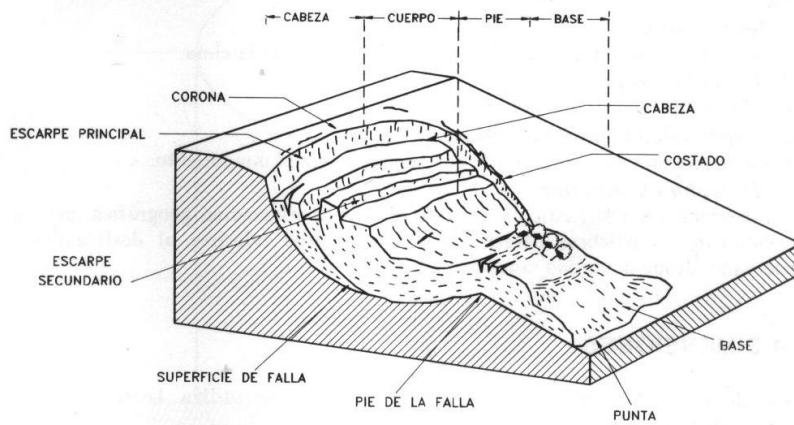


Fig. 1: Partes de un deslizamiento (Varnes, 1978)

Clasificaciones geomorfológicas y geotécnicas para estudios de estabilidad de deslizamientos

Según la bibliografía consultada y más concretamente según el texto “Curso de Geotecnia para infraestructuras” de Luis Ortuño Abad, a la hora de estudiar la estabilidad de un deslizamiento, se acostumbra a clasificarlos geomorfológicamente y geotécnicamente, con el fin de conocer con mayor detalle las condiciones del caso de estudio.

Clasificación geomorfológica

Dependiendo de la estratigrafía y de la geomorfología del deslizamiento, se distinguen tres casos principales de mecanismos de inestabilidad:

Deslizamientos translacionales: existencia de un espesor alterado (meteorización sobre una capa sana de sustrato o bien coluvión sobre sustrato existente). Fig.2.

Deslizamientos rotacionales: Circular(terreno homogéneo(arcillas); zona alta poco rota(bloque))

Deslizamientos compuestos: Cambio litológico, con zonas de alteración, suelen reflejar la presencia de una heterogeneidad a escasa profundidad.

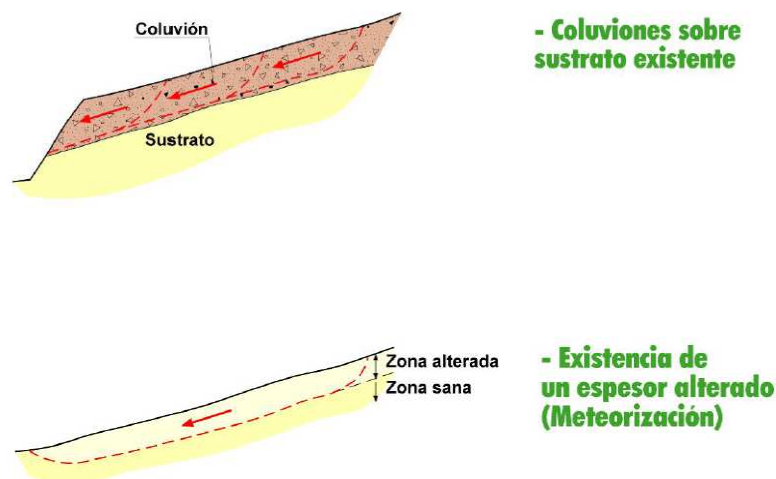


Fig.2: Casuística para el caso de los deslizamientos translacionales (Luis Ortuño Abad.2004)

Clasificación geotécnica

Este tipo de clasificación nos ayuda a determinar qué tipo de problema geotécnico vamos a resolver y qué valores de los parámetros de resistencia deberemos emplear en cada caso.

Los parámetros de resistencia serán: parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción) y las condiciones de presión intersticial.

Clasificación geotécnica en función de la estructura del suelo

Primeros deslizamientos

Deslizamientos a favor de superficies de rotura preexistentes

En el caso de que el suelo esté formado por arcillas, estas se pueden encontrar fuertemente reorientadas en la dirección del movimiento previo y por ello la resistencia al corte disponible puede ser muy próxima o incluso coincidente con la residual.

Clasificación geotécnica en función del régimen de presión intersticial

Como se puede deducir a partir de la combinación de la fórmula de tensiones efectivas de Terzaghi con la de resistencia de Mohr Coulomb la presión intersticial influye de forma muy directa sobre la resistencia del terreno y por consiguiente sobre su factor de seguridad frente al deslizamiento.

La presión intersticial depende de forma transitoria de los cambios tensionales que se puedan producir en el terreno, como por ejemplo los efectos que pueda tener la excavación de un desmonte en un talud.

Genéricamente, se contemplan tres situaciones en función de la presión de poros:

- Con drenaje
- Sin drenaje
- Situación intermedia

El caso de un talud o una ladera ya existente, sin nuevos cambios tensionales debidos por ejemplo a una excavación, con un nivel de saturación estable, es el caso más simple.

En este caso el flujo del agua es permanente y estacionario y por consiguiente la presión intersticial en cada punto se determinará a partir de la correspondiente red estacionaria de flujo. Los parámetros de resistencia a emplear en este caso serán los de las tensiones efectivas.

Por el contrario, un caso más complejo sería cuando se producen cambios tensionales. Entonces la presión intersticial es una variable dependiente de estos cambios y del tiempo. Esta situación es muy corriente a la hora de trabajar con arcillas debido a su baja permeabilidad.

El método de equilibrio límite

Métodos para el cálculo de estabilidad de taludes

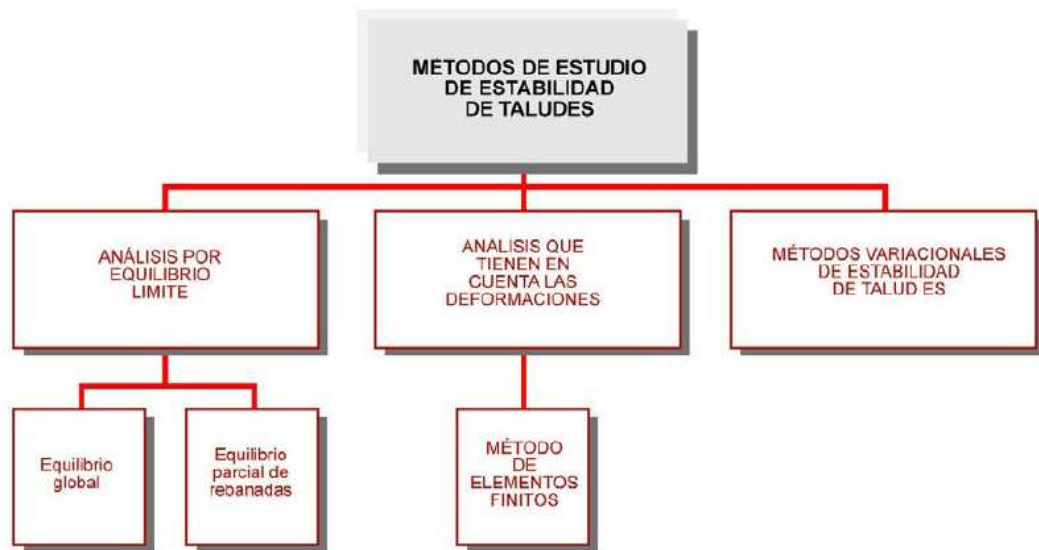


Fig 3: Métodos de cálculo de estabilidad de taludes (Olalla, C.(1999))

Como se puede observar en la Fig.3 existen varios métodos de estudio de estabilidad de taludes. El programa SLIDE de Rocscience parte del análisis por equilibrio límite y concretamente trabaja con el método de equilibrio parcial de rebanadas.

El método de equilibrio parcial de rebanadas o dovelas considera la masa deslizante dividida en una serie de fajas o dovelas verticales. Se toma este recurso, porque en la mayor parte de casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante solo la aplicación de las leyes de la estática.

Variables que intervienen en la estabilidad de un talud

Los métodos de equilibrio límite son de los más utilizados en la práctica para el cálculo de estabilidad de taludes debido a su sencillez y a que el FS obtenido se acerca mucho al valor real.

El parámetro distintivo del método de equilibrio límite es el factor de seguridad (FS). El factor de seguridad nos aporta una relación cuantitativa entre las condiciones en las que se encuentra el talud y las condiciones que llevan a su rotura.

FS=resistencia al corte máxima a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento (τ_r)/tensiones de corte existentes a lo largo de la superficie

$$FS = \frac{\int \tau_r * ds}{\int \tau * ds}$$

Ec.1: Fórmula del Factor de Seguridad (FS)

Si el factor de seguridad es menor que 1, entonces el deslizamiento es posible.

Desde el punto de vista más intuitivo también se puede entender el factor de seguridad como la relación entre las fuerzas estabilizadoras y las desestabilizadoras que intervienen en el talud. En la Fig.4 se muestran algunas de ellas:

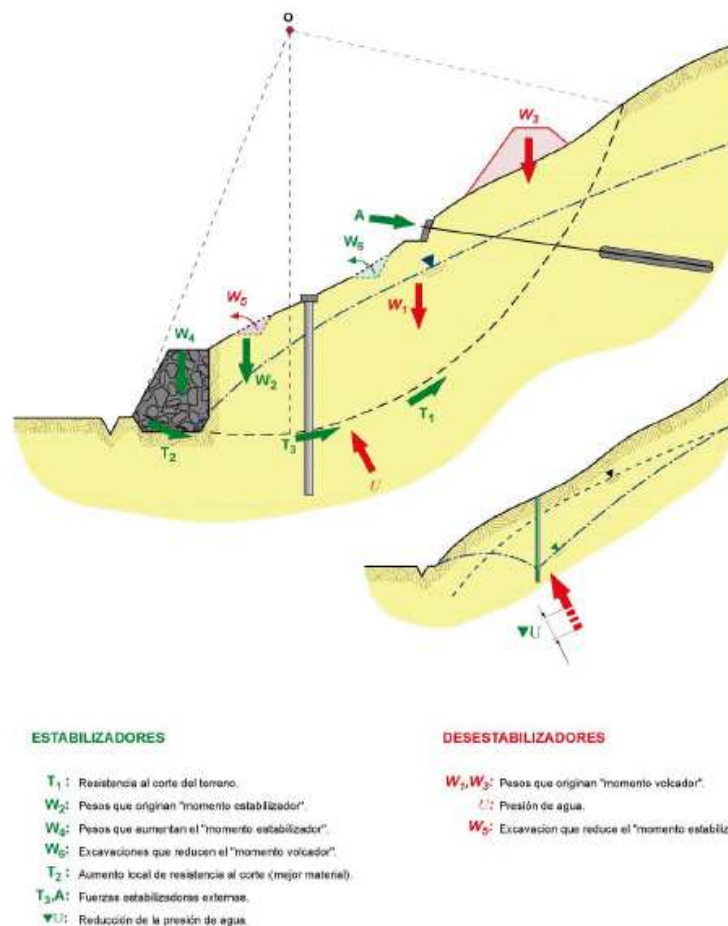


Fig. 4: Acciones estabilizadoras y desestabilizadoras de un talud supuesto circular (Luís Ortuño Abad.2004)

Fases de cálculo en la aplicación del método de equilibrio límite

1. Determinar una superficie de rotura cinemáticamente posible (rectas, circunferencias o espirales logarítmicas)
2. A partir de la condición de equilibrio se establecen relaciones entre las fuerzas presentes en el problema

Grupo A: Fuerzas desestabilizadoras

Grupo B: Fuerzas resistentes al desequilibrio

Las condiciones de equilibrio que se exigen son:

- a) Fuerzas H
- b) Fuerzas V
- c) Momentos respecto a un punto arbitrario

Cálculo del factor de seguridad (FS)

Principalmente existen tres métodos para el análisis de estabilidad con el método de equilibrio límite:

Análisis de roturas planas en taludes infinitos

Especialmente adecuado para movimientos traslacionales en los que la superficie de deslizamiento es paralela a la topográfica, y en los que se exista una anchura considerable en el eje perpendicular al deslizamiento

Bishop y Fellenius (método de las rebanadas/Bishop simplificado)

Estos métodos parten de la hipótesis inicial de que el punto de aplicación de la fuerza normal efectiva a la superficie de rotura, se sitúa en el centro de la base de la rebanada, lo que da lugar a que la resultante $N_i = N'_i + U_i$ (donde U es la presión de poros y N' la fuerza normal efectiva) deba pasar por el centro O.

El método de Bishop simplificado

En este caso la superficie de rotura se considera circular y la condición fundamental para la obtención del coeficiente de seguridad se basa en el equilibrio de momentos.

En nuestro caso de estudio, la superficie de rotura es plana, sin embargo calculamos con el método de Bishop simplificado. Esto se debe a que aunque el método de Bishop está pensado inicialmente para superficies de rotura circulares, también puede ser aplicado a superficies de rotura no circulares adoptando un centro de rotación virtual.

La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método, su expresión es la siguiente:

$$FS = \frac{\sum [C' + (W - ub) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha}$$

Ec.2: Fórmula del FS según Bishop simplificado

Dónde:

$$ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{FS} \right)$$

Ec.3: Fórmula para ma

b = Ancho de la Dovela

W = Peso de cada dovela

C', ϕ' = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

Como se puede observar en la ecuación, el término factor de seguridad FS se encuentra tanto en la izquierda como en la derecha de la ecuación; por ello se requiere un proceso de interacción para calcular el factor de seguridad.

El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario.

Aunque existen métodos de mayor precisión que el método de Bishop, las diferencias de los factores de seguridad calculados, no son grandes.

3. Metodología

3.1 Recopilación de datos

El modo de proceder durante el proyecto consistió en un primer lugar en una recopilación de datos sobre diferentes aspectos del deslizamiento. En este punto se buscó información entre otros, sobre la situación exacta del deslizamiento a través del IGCC (Institut Geològic i Cartogràfic de Catalunya), así como de los datos de los parámetros georesistentes del deslizamiento o los datos registrados por los diferentes sensores de auscultación del deslizamiento.

A la vez también se recopiló información de la estructura de la morfología del deslizamiento o de su composición.

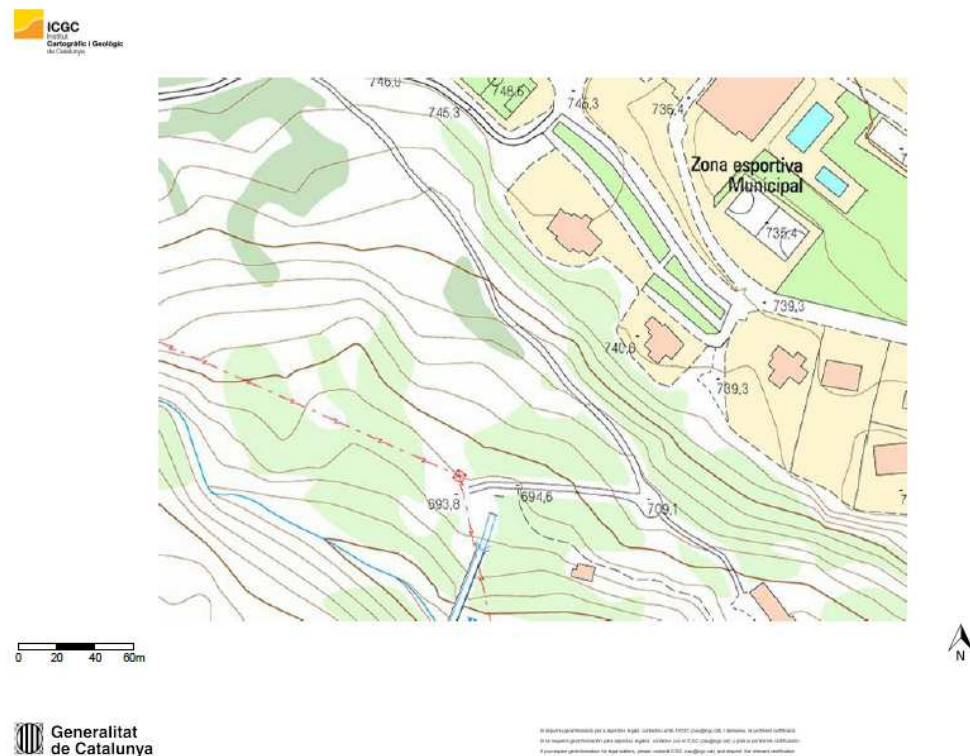


Fig.5 : Mapa topográfico del deslizamiento. Fuente: IGCC

3. 2 Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en realizar un reconocimiento de la zona de estudio con la finalidad de identificar algunos de los trechos característicos de los deslizamientos, que ya han sido expuestos en el apartado de “Conceptos básicos”.

Además se realizó un levantamiento topográfico en los sentidos longitudinal y transversal del deslizamiento.

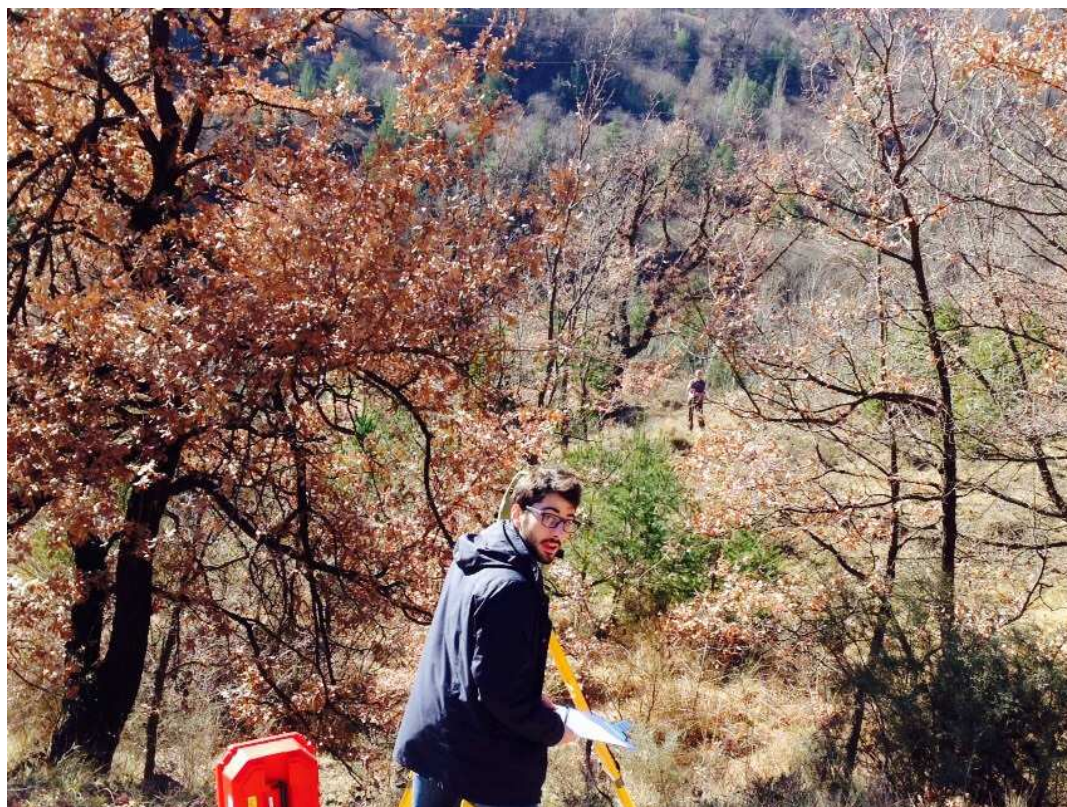


Fig.6: Medición mediante estación total y jalón

3.3 Cálculo de la estabilidad

El cálculo de la estabilidad se realizó mediante el programa SLIDE de Rocscience. Este programa trabaja con el método simplificado de Bishop y mediante el programa se realizó un análisis de sensibilidad de los varios parámetros que tienen que ver con la estabilidad del deslizamiento.

Como se comentó en la introducción el objeto de este trabajo final de grado es aplicar unos conocimientos generales sobre mecánica de suelos e ingeniería geológica a un caso práctico de un deslizamiento en la localidad de Cercs, en la comarca del Berguedà en Catalunya.

4. Resultados

4.1 Descripción del deslizamiento

En nuestro caso de estudio el deslizamiento era traslacional y ya existía una superficie de rotura que se encontraba aproximadamente 1m bajo la superficie. Esto se tuvo en cuenta a la hora de crear nuestro modelo para SLIDE. Ya que los criterios resistentes serán muy próximos o iguales a los de las condiciones residuales.

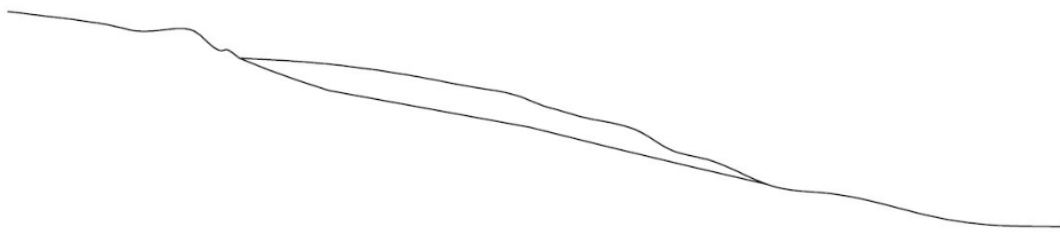


Fig.7: Representación del corte longitudinal mediante AutoCAD

A continuación en las Fig.8 y Fig.9 se pueden observar algunos de los trechos característicos de los deslizamientos que se han comentado en el apartado de conceptos básicos.



Fig.8: Escarpe secundario del deslizamiento. Longitud aproximada (30cm)

En el deslizamiento existen dos escarpes, el que se muestra en la Fig.8 corresponde al secundario. Este tiene una variación del nivel de unos 30cm. El escarpe principal estaba cubierto por arbustos y fue imposible fotografiarlo.



Fig.9: Vista del deslizamiento en el sentido del corte longitudinal

A la derecha de esta vista en la dirección longitudinal (Fig.9) se encuentra el pie del deslizamiento, en la parte izquierda se encuentran los escarpes que se han comentado anteriormente.

4.1.1 Sistema de auscultación

La ladera en la que se encuentra el deslizamiento fue instrumentalizada mediante un sistema de auscultación para estudiar con mayor detalle varios de los parámetros que afectan a la estabilidad del deslizamiento. Para ello se crearon dos estaciones. Mientras que la estación SLOPE se encuentra en el mismo deslizamiento, la estación METEO se encuentra en un acueducto a pocos metros de distancia del pie del deslizamiento.

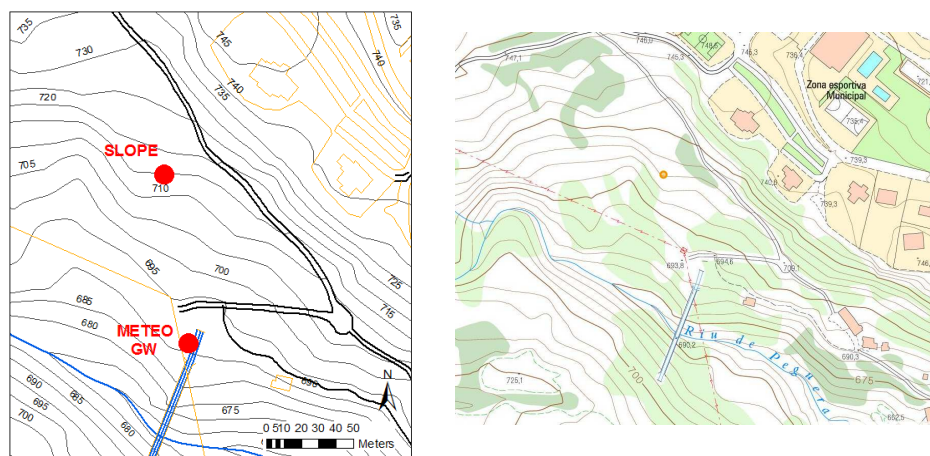


Fig.10: Mapa topográfico y situación del deslizamiento superficial en Cercs. Se muestran la ubicación de las dos estaciones de auscultación (METEO y SLOPE).
Fuente: IGCC

En la siguiente Tabla 1 se puede observar por qué sensores está formada cada estación, además de sus marcas y modelos.

Abreviatura de la estación	Sensores (cantidad de sensores instalados)	Marca y modelo
METEO	Pluviómetro (1)	Decagon ECRN-100
	Sensor de temperatura y humedad relativa del aire (1)	Campbell Scientific HC2S3
	Barómetro (1)	Bosch BMP085
SLOPE	Sensor de humedad del suelo (3)	Decagon 10HS
	Sensor de succión (2)	Decagon MPS-2
	Sensor de temperatura del suelo (2)	
	Piezómetro (1)	Geosense VWP-3200
	Sensor de desplazamiento (1)	ASM WS12-3000

Tabla 1: Resumen de los sensores instalados en la auscultación de Cercs

El pluviómetro de la estación METEO se instaló para observar una posible relación entre los episodios de lluvia y las variaciones con el nivel freático en el deslizamiento.

Por otro lado, en la estación SLOPE se instaló un sensor de desplazamiento para medir posibles reactivaciones del deslizamiento, un sensor de succión para evaluar el problema desde el punto de vista de la mecánica de suelos parcialmente saturados y el sensor de humedad del suelo y el piezómetro tienen que ver con la determinación del nivel freático en el deslizamiento.

En las Fig.11 y Fig.12 se muestran imágenes de las estaciones METEO y SLOPE

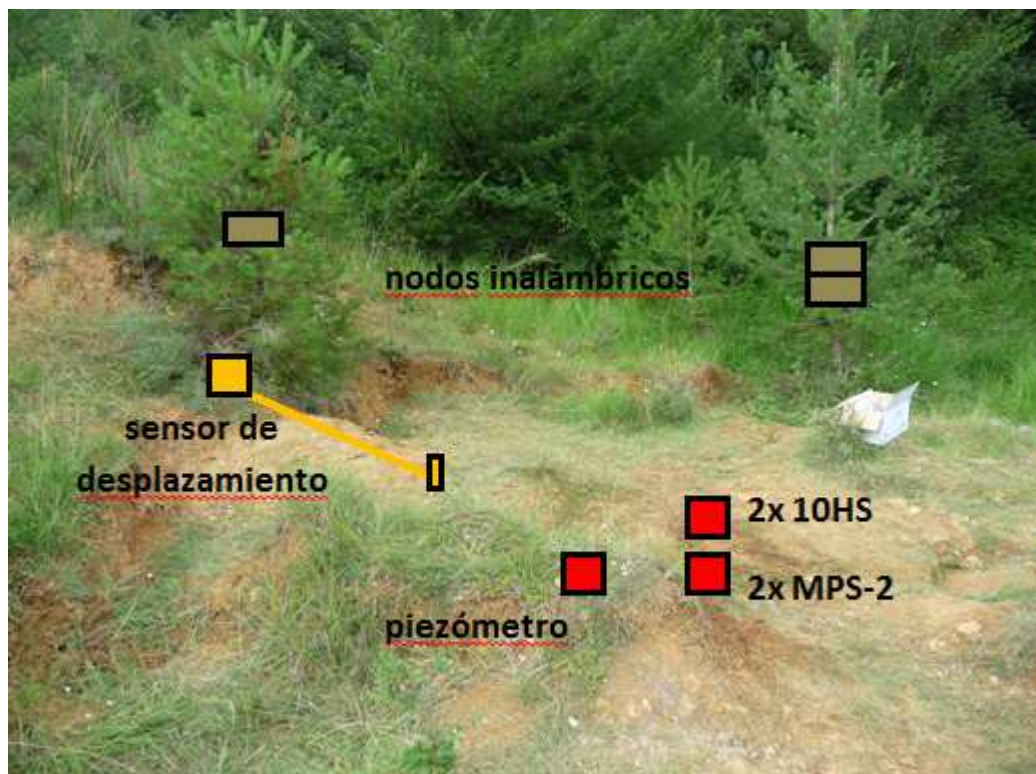


Fig.11: Estación SLOPE con situación de los sensores de auscultación



Fig.12: .Estación METEO con situación de los sensores de auscultación

4.1.2 Materiales afectados y criterios de resistencia

En la Fig.13 podemos observar la estructura del suelo y la situación de los sensores de humedad y de succión.

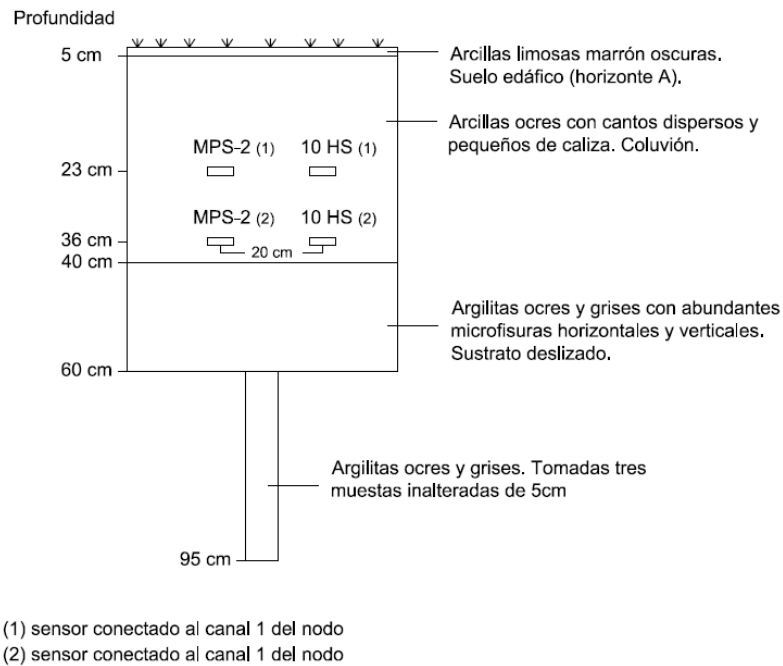


Fig.13: Estratos del suelo del deslizamiento (Marcel Hürlimann)

La composición del suelo desde el punto de vista geológico es la siguiente: en los primeros 5cms encontramos arcillas limosas de color marrón oscuro este es un suelo edáfico por su composición en relación con el contenido en materia orgánica, en los siguientes 20cms hay un coluvión con arcillas ocre con cantos dispersos y pequeños de caliza, a partir de los 40 argilitas ocre y grises con abundantes microfisuras horizontales y verticales y a partir de los 90 cms están las argilitas ocre y grises y es donde se encuentra la superficie de rotura preexistente.

Criterios de resistencia

A la hora de determinar los criterios resistentes de nuestro caso de estudio, el departamento de Ingeniería Geotécnica de la UPC tomó cuatro muestras del suelo del deslizamiento y encargó a la consultora GEOMAR Enginyeria del Terreny el análisis de ellas.

Los objetivos principales de estos ensayos eran determinar el tipo de suelo con el que se estaba tratando y sus características geo-resistentes.

Para ello, se realizaron ensayos de humedad natural, densidad natural, granulometría, límite líquido y corte directo.

Resumen de estos ensayos:

Número de mostra		m-1	m-2	m-3	m-4					
Material		Col·luvió	Col·luvió	Argil·lites	C-3					
Profunditat (m)		-	-	-	0,60					
Longitud (m)		-	-	-	0,35					
Tipus de mostra		C (MR)	A (MI)	A (MI)	C (MR)					

RELACIÓ D'ASSAIGS										
HUMITAT NATURAL (%)			19,79	10,54	20,09					
DENSITAT (gr/cm3)	Aparent		1,71	2,03	2,03					
	Seca		1,43	1,83	1,72					
DENSITAT PART. SÒLIDES (gr/cm³)					2,718					
GRANULOMETRIA PER TAMISSAT	%Passa #5 UNE	90,6			97,4					
	%Passa #2 UNE	82,6			96,6					
	%Passa #0,4 UNE	76,6			95,1					
	%Passa #0,08 UNE	70,2			92,7					
LÍMITS D'ATTERBERG	L. Líquid	40,1			49,8					
	L. Plàstic	22,4			20,2					
	Índex plasticitat	17,7			29,6					
CLASSIFICACIÓ U.S.C.S.		CL			CL					
GRANULOMETRIA PER SEDIMENTACIÓ	% llims				47,55					
	% argiles				42,55					
CÀRREGA PUNTUAL EN ROCA (Mpa)										
TALL DIRECTE	Cohesió (Kg/cm²)		0,03	0,19						
	Angle de fregament intern (°)		26,0	29,5						
TALL DIRECTE RESIDUAL	Cohesió (Kg/cm²)				0,00					
	Angle de fregament intern (°)				14,4					

Fig.14: Resumen de los diferentes ensayos. GEOMAR

El ensayo de corte directo y la resistencia residual

En nuestro caso de estudio es de especial relevancia el concepto de la resistencia residual de las arcillas. Por ello a continuación se explica en qué consiste esta resistencia residual y con qué ensayo fue determinada.

El ensayo de corte directo consiste en contener una muestra en un molde rígido, de sección cuadrada o circular, de unos 50-100 mm de lado, dividido en dos mitades por un plano horizontal. La muestra se cubre con una tapa independiente, también rígida y en las caras superior e inferior, se colocan piedras porosas que permiten el drenaje de la probeta.

Sobre la tapa se aplica una carga vertical que, repartida en el área de la probeta, supone una tensión normal. A continuación, se aplica una carga horizontal, que supone una tensión tangencial, de forma que se produzca el deslizamiento entre las dos partes de la muestra. Fuente: <http://ingcivilensayos.blogspot.es>

Durante el ensayo se miden los desplazamientos relativos (horizontal dx y vertical dz) entre las dos mitades de la muestra.

El objetivo principal de este ensayo es mantener constante la tensión normal y aumentar la tensión tangencial hasta la rotura de la muestra.

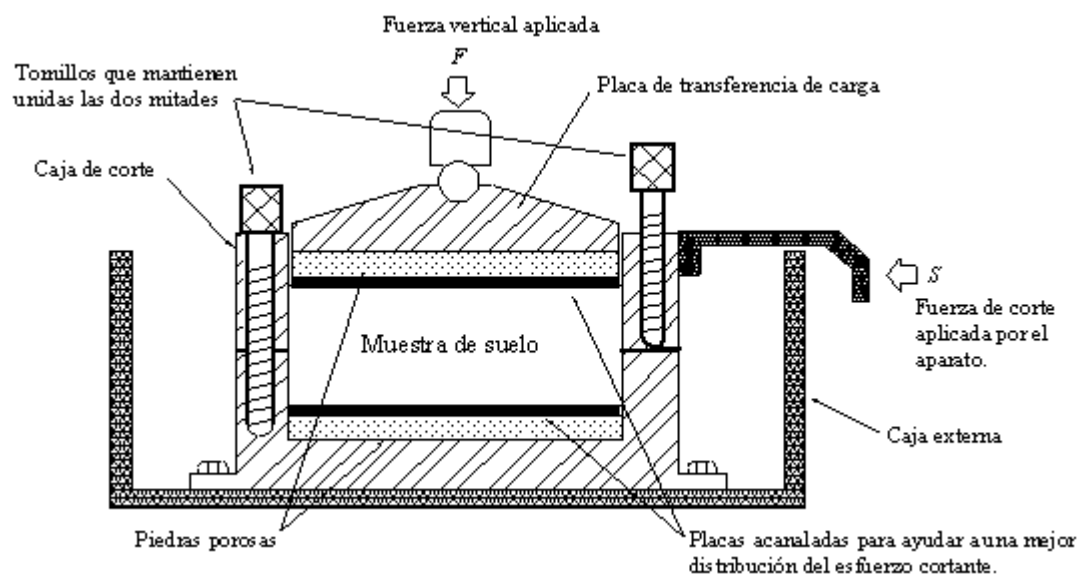


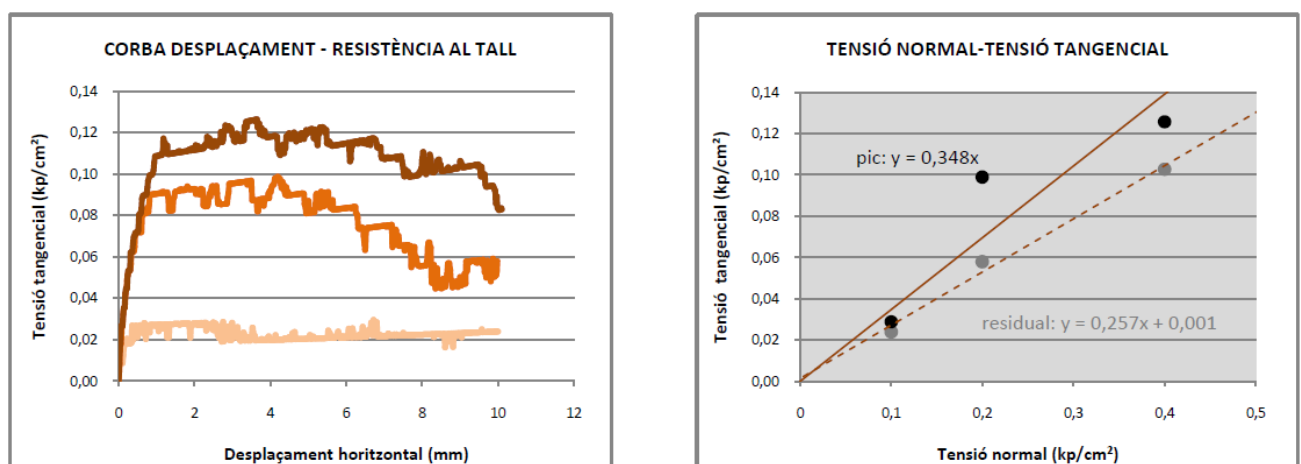
Fig.15:Ensayo de corte directo. Fuente: <http://ingcivilensayos.blogspot.es>

Tanto en el caso de arenas como de arcillas con un índice de poros relativamente pequeño, se observa durante el transcurso del ensayo de corte directo, como a medida que aumentan los desplazamientos horizontales (deformaciones horizontales), va aumentando la presión tangencial en la muestra. Cuando se aplican presiones superiores a la de preconsolidación la resistencia pasa a ser la crítica. En el caso de las arcillas, si se aumenta indefinidamente la distorsión horizontal, se observa que la resistencia llega a ángulos de rozamiento con valores claramente menores al crítico. Esta resistencia recibe el nombre de resistencia residual.

La resistencia residual se debe a que en las arcillas las partículas son muy aplanadas (la relación entre las dimensiones mayor y menor de una partícula puede variar entre 10 y 100), por lo que a lo largo del proceso de corte, las partículas se van reorientando en la dirección del deslizamiento, con lo que se llega a resistencias inferiores a la crítica.

La resistencia residual juega un papel importante en nuestro caso de estudio. En laderas en las que hubo un deslizamiento anteriormente, y por lo tanto donde se produjeron deformaciones muy grandes, la resistencia a lo largo de la superficie de deslizamiento puede haber descendido a valores próximos al residual. Por este motivo a la hora de estudiar la estabilidad con nuestro modelo, realizaremos un análisis de sensibilidad con respecto al ángulo de fricción y trabajaremos con intervalos próximos o iguales al valor residual.

A continuación en la Fig.16 se pueden observar los resultados del ensayo de corte directo, que se realizó con una muestra tomada a 60cm de profundidad de nuestro deslizamiento en Cercs.



El ensayo se realizó para tensiones normales de: 0,1;0,2 y 0,4 kp/cm^2 . En el caso de la tensión normal de 0,4 kp/cm^2 la tensión tangencial de pico fue superior de 0,12 kp/cm^2 y la residual fue ligeramente superior a 0,10 kp/cm^2 . En el caso de la tensión normal de 0,2 kp/cm^2 , la tensión tangencial de pico fue ligeramente inferior a 0,10 kp/cm^2 y la residual fue ligeramente inferior a 0,06 kp/cm^2 . En el caso de la tensión normal de 0,1 kp/cm^2 , la tensión tangencial de pico fue ligeramente superior a 0,03 kp/cm^2 y la residual fue ligeramente inferior a 0,03 kp/cm^2 .

El ángulo de rozamiento residual obtenido a partir de estos resultados fue de 14,4°.

4.2 Trabajo de campo

A la hora de crear el modelo para el programa SLIDE de Rocscience, surgió en un primer momento la necesidad de definir una geometría que se asemejara lo máximo posible a la realidad.

Para ello se decidió realizar un trabajo de campo y mediante una estación total hacer un levantamiento topográfico tanto en la dirección longitudinal del deslizamiento, como en su dirección transversal.

El proceso que se siguió para realizar el levantamiento topográfico consistió en definir tres estaciones de radiación de puntos. Se decidió colocar la estación 1 (E1) bajo el pie del deslizamiento en la proximidad de una torre de línea de alta tensión. La segunda estación fue situada en la carretera, al lado este del deslizamiento y finalmente la estación 3 (E3) se colocó al oeste del deslizamiento.

El levantamiento topográfico se realizó a partir de los puntos radiados desde la estación 3.

El motivo por el que se tomó más de una estación para realizar las mediciones fue porque debido a que el deslizamiento podría activarse en un futuro, se quería poder disponer de al menos un punto fijo de referencia, para posibles levantamientos topográficos posteriores.

En la Fig.18 se puede observar en detalle una vista en planta de la situación de los puntos de estacionamiento, así como también de los puntos radiados para el perfil en sentido longitudinal.

En el caso del sentido transversal, los puntos en planta se pueden observar en la Fig.17.



Fig.17: Situación en planta de puntos del corte transversal. Fuente: ICGC y elaboración propia



It is important to note that the results of the present study are based on a cross-sectional design. The results may be different if the data were collected longitudinally. The results of the present study may also be different if the data were collected in a different country or culture. The results of the present study may also be different if the data were collected in a different time period.



29

Cálculos en el levantamiento topográfico

Como ya se ha explicado anteriormente para realizar el levantamiento topográfico se utilizó una estación total y des de tres puntos de estacionamiento (E1, E2 y E3) se radiaron puntos para obtener un perfil en la dirección longitudinal y transversal del deslizamiento.

Las lecturas de la estación total nos aportaban tres datos: la distancia horizontal, la lectura azimutal y la lectura cenital.

La lectura azimutal tiene que ver con el ángulo que forma la recta que une el lector de la estación total con la mirilla del jalón respecto al norte y la lectura cenital tiene que ver con el ángulo vertical que forman la recta que une el lector de la estación total con la mirilla del jalón, con la vertical.

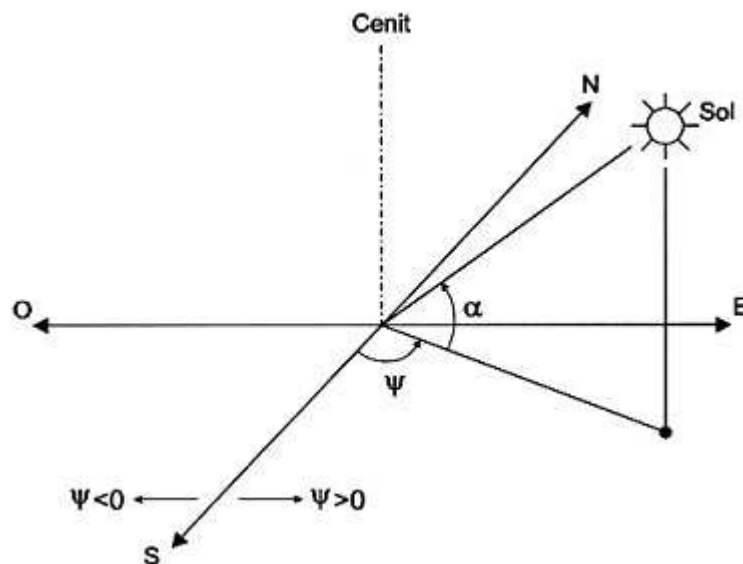


Fig.19: Esquema visual para la lectura cenital y azimutal con el ejemplo del Sol

Conociendo la posición de los puntos de estacionamiento en planta y a partir de la distancia horizontal y el ángulo azimutal, se pudo determinar posteriormente la situación de cada uno de los puntos radiados en planta. Como se ha visto anteriormente en las Fig.17 y Fig.18.

A la hora de realizar el levantamiento topográfico, con la finalidad de representar de la mejor manera un corte longitudinal se realizó una recta de regresión lineal a partir de los puntos obtenidos en planta. En la Fig.20 se puede ver un gráfico con las coordenadas en planta resultantes:

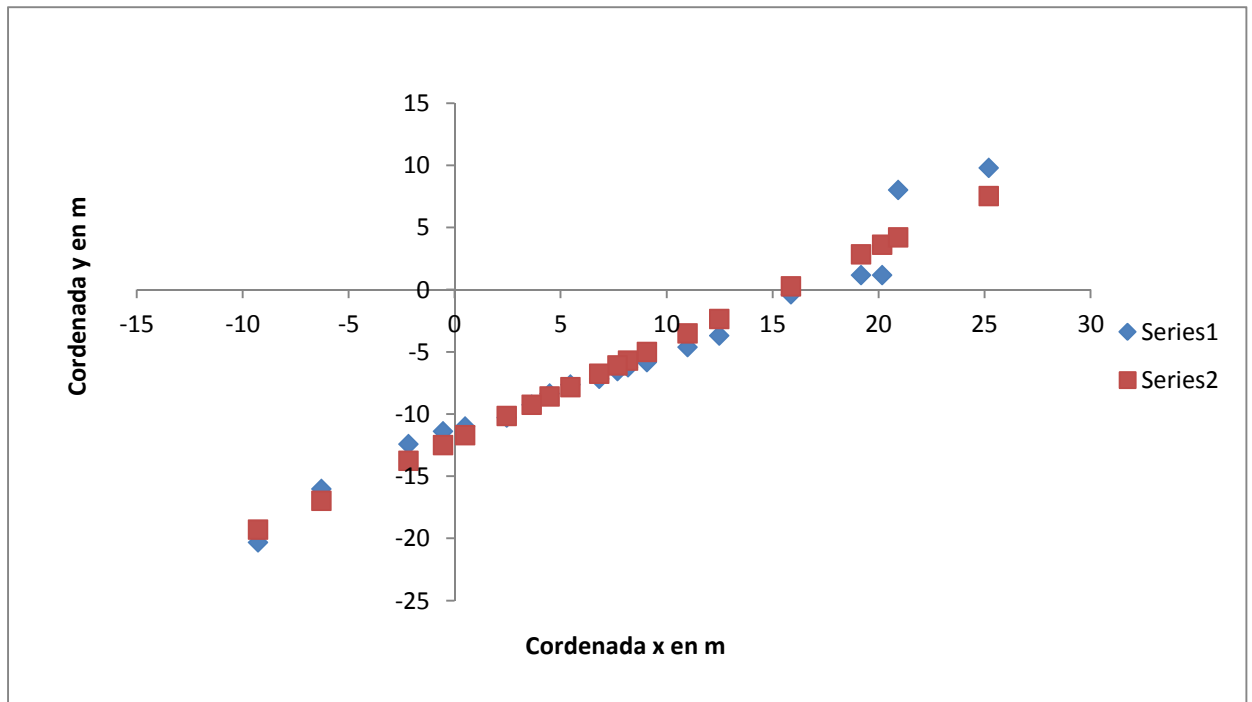


Fig.20: Curva de regresión ajustada . En azul las coordenadas iniciales de los puntos. En rojo los puntos de la recta de regresión

La regresión resultó tener un coeficiente de correlación R^2 de 0,96 con lo que se dio por suficientemente bueno el ajuste.

Resultó un poco más complicado determinar la coordenada Z de los puntos de nuestro levantamiento topográfico.

El cálculo se realizó a partir de la siguiente casuística:

Para el caso de ángulo zenital menor a 100° (La estación total nos proporcionaba los datos en grados centesimales, no sexagesimales):

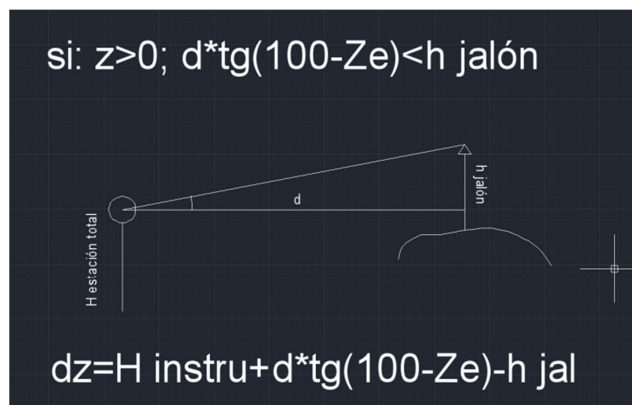
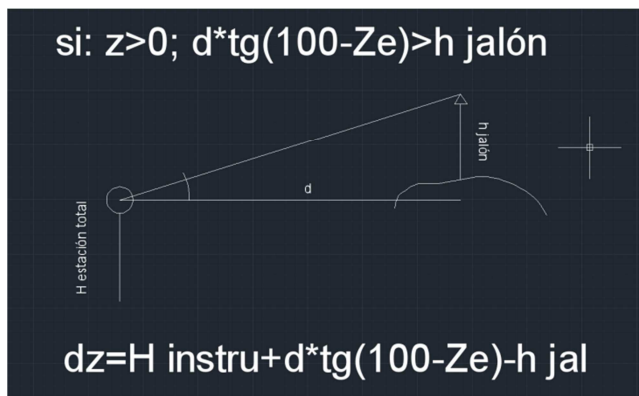


Fig.21: Esquema ilustrativo del método de cálculo para $z > 0$

Para el caso de ángulo cenital mayor a 100°

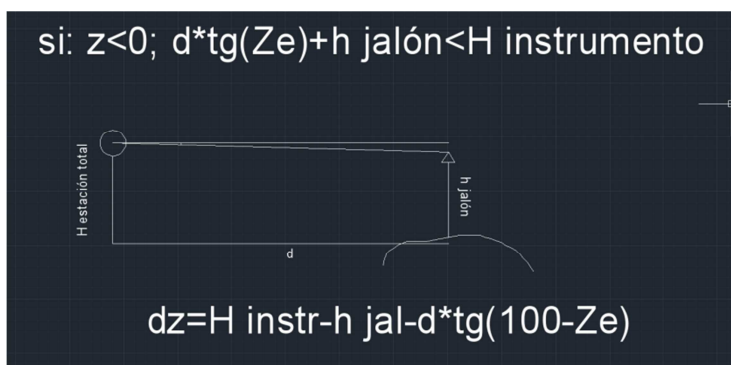
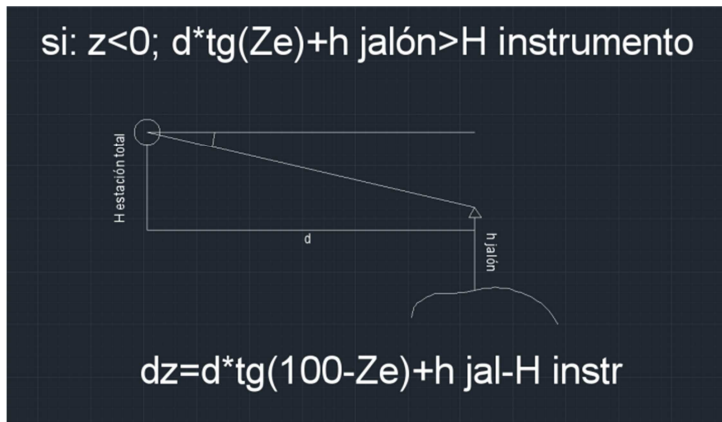


Fig.22: Esquema ilustrativo del método de cálculo para $z < 0$

El resultado final del trabajo de campo con las respectivas dimensiones de los perfiles se puede observar en las siguientes Fig.23 y Fig.24 donde se muestran los cortes longitudinal y transversal del deslizamiento

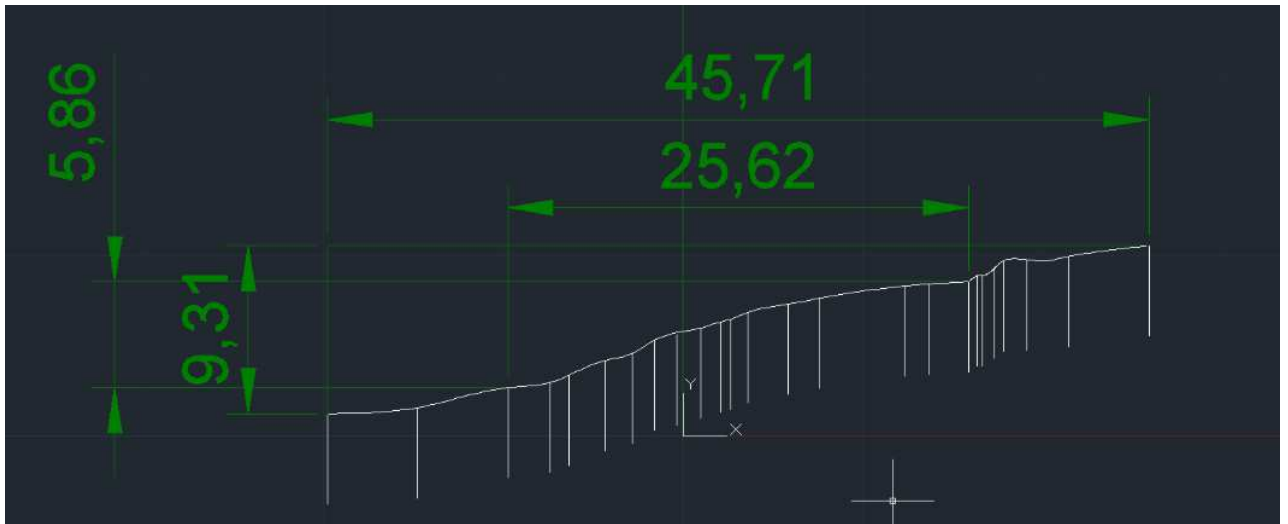


Fig.23:Corte longitudinal con cotas con AutoCAD

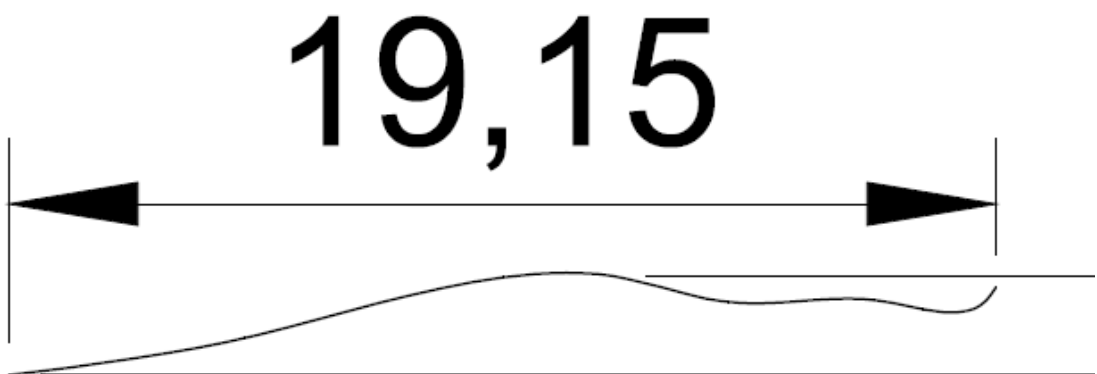


Fig.24:Corte transversal con cotas con AutoCAD

4.3 Análisis de la estabilidad

A la hora de crear el modelo para SLIDE, lo primero que se hizo fue representar la topografía a partir del documento de AutoCAD fruto del levantamiento topográfico. El resultado final se puede observar en la Fig.25

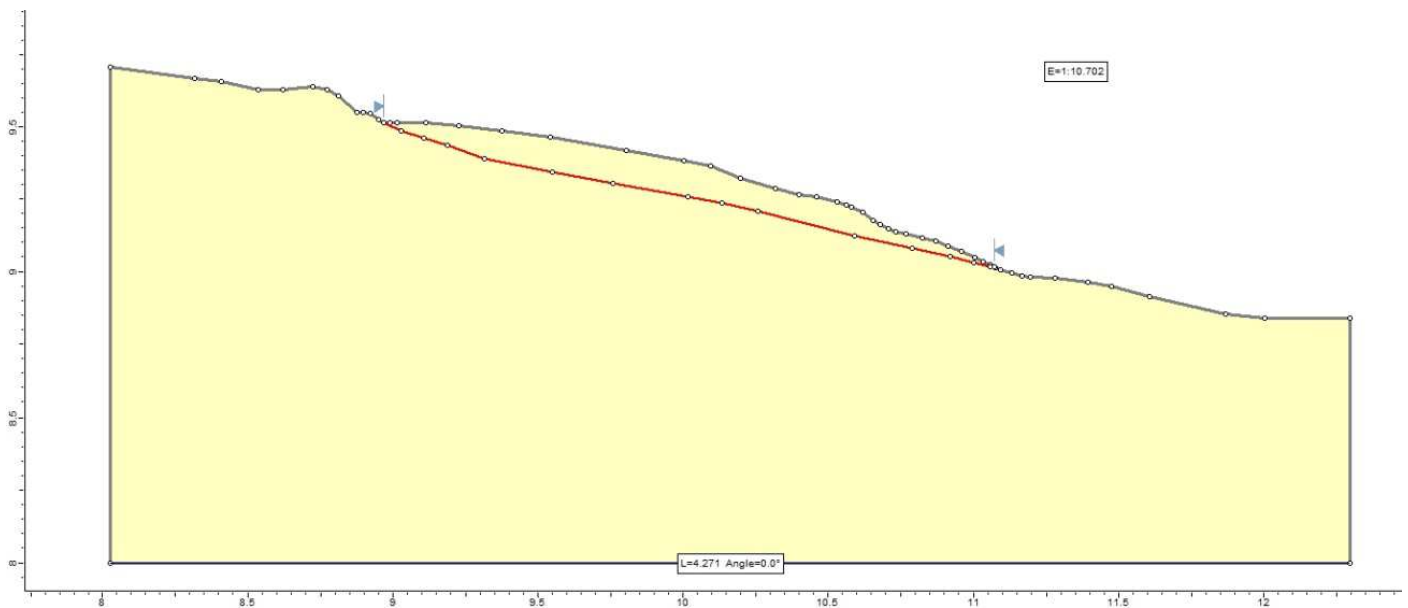


Fig.25: Se muestra la topografía del perfil en la dirección del movimiento y la superficie de rotura inicial a escala 1:10,702

En la Fig.25 podemos observar una línea roja. Esta línea roja es la superficie de rotura preexistente de nuestro deslizamiento y es la que fue estudiada mediante SLIDE.

A continuación se introdujeron todos los parámetros resistentes del deslizamiento, para así ya poder empezar a estudiar la casuística.

Peso específico y cohesión

En los ensayos fue determinada una densidad aparente media de $2,03 \text{ g/cm}^3$

A partir de aquí el peso específico aparente, que es aquel que representa la relación entre el peso total y el volumen total, fue de $20,3 \text{ KN/m}^3$.

La zona en la que nos interesaba calcular el factor de Seguridad es la de la superficie de rotura ya existente, esto quiere decir que nuestra zona estudio se encuentra en condiciones residuales o muy próximas a las residuales, por ello, en el modelo se trabajó con cohesión igual a 0.

4.3.1 Definición de los valores y forma del nivel freático

Para elegir los valores del nivel freático nos basamos en los datos que nos proporcionaba el piezómetro de la estación SLOPE en el deslizamiento.

La definición más estricta del piezómetro o tubo piezométrico es la de un tubo que conectado a uno de los lados de un recipiente en el que se encuentra un fluido, nos aporta información de cuál es la presión del fluido en el punto en que se conecta el tubo. Experimentalmente se observa que el agua sube por el tubo piezométrico, hasta una altura superior a la de la superficie del fluido, esto es debido a que también hay que tener en cuenta la presión atmosférica a la que está sometido el fluido. En un tubo piezométrico la presión es la misma que dentro del depósito que contiene el fluido.

A partir de estos datos, se realizó una distribución normal mediante Excel, para poder determinar con mayor claridad cuáles podían ser los valores más representativos de la presión de agua.

El gráfico resultante del cálculo de esta distribución normal fue el siguiente:

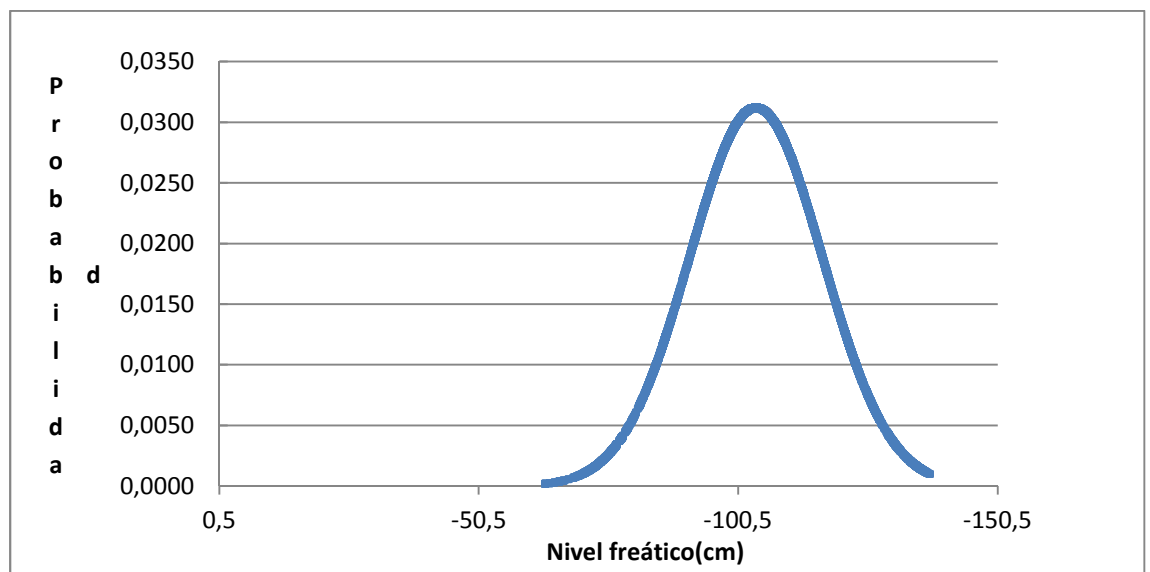


Fig.26: Nivel freático. Distribución normal. Media=-103,4 cm

Observando la Fig.26 podemos ver como el nivel freático más común, es decir, aquel nivel freático que corresponde a la media es de 1,03m bajo la superficie. Esto quiere decir que el nivel freático más probable se encuentra en algunos tramos ligeramente por debajo y en otros ligeramente por encima de la superficie crítica del deslizamiento y por lo tanto este es un resultado positivo desde el punto de vista de la seguridad.

Además podemos ver que los valores en los extremos de la distribución normal, son 1,37 i 0,63.

Se decidió tomar estos tres valores como representativos y estudiarlos con mayor detalle en el modelo. Para así también poder observar como evolucionaba el factor de seguridad en función de los valores del nivel freático.

Además de estos tres valores se consideraron las dos situaciones más extremas en cuanto al nivel freático se refiere. Por un lado el caso totalmente seco y por otro el caso totalmente saturado.

A la hora de crear el modelo para SLIDE surgió el problema de la representación del nivel freático. A continuación se justifica la forma final de este por la que se optó.

Justificación forma del nivel freático

Existen dos tipos de movimientos en cuanto al agua subterránea, el movimiento gravitacional y el movimiento capilar. El movimiento gravitacional, se da únicamente en la dirección vertical del suelo (hacia abajo), mientras que el movimiento capilar se da en todas direcciones. El movimiento capilar se fundamenta en la fuerza de atracción de las partículas líquidas hacia las sólidas y por la cohesión entre las partículas que forman el agua.

La capilaridad es uno de los causantes de que la topografía superficial se vea reflejada en la topografía del nivel freático.

Por ello a la hora de representar el nivel freático para hacer el análisis de inestabilidad y ante la de información piezométrica insuficiente, se ha dibujado el nivel freático de forma que refleje la topografía superficial.

La altura capilar se calcula según Soos(1990) :

$$h = \frac{0.3}{d} * \cos \alpha$$

Ec.4: Fórmula de la altura capilar según Soos

Dónde:

d=valor medio del espacio entre las partículas

α =el ángulo entre el agua y la pared capilar

A continuación en la Fig.27 se puede observar la representación del nivel freático, para el caso de -63cm en el modelo.

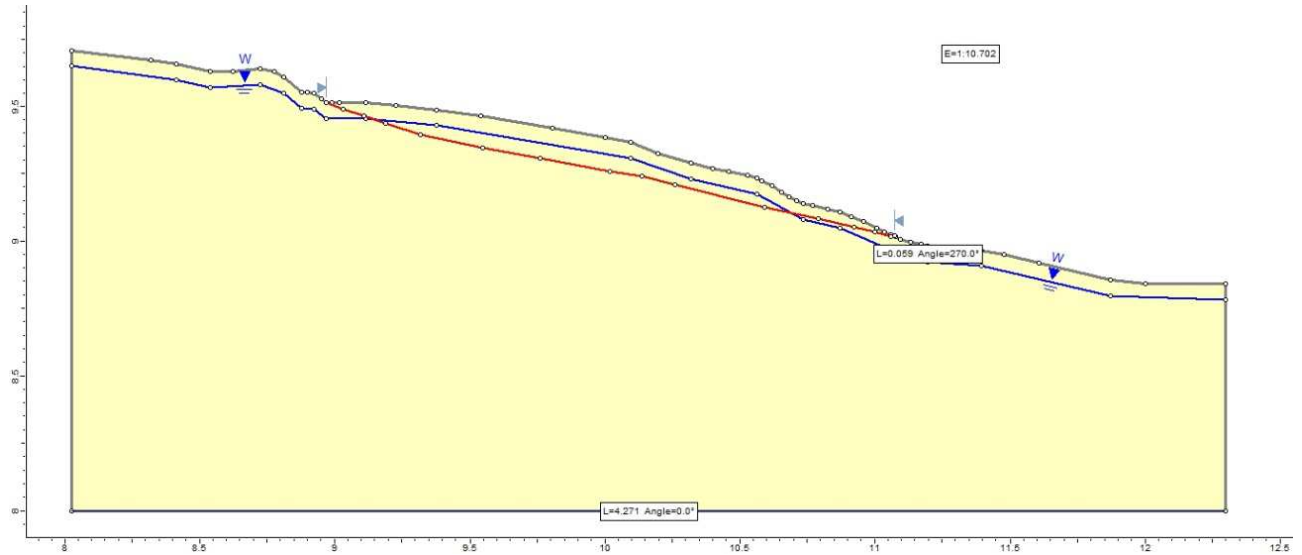


Fig.27: Representación del nivel freático. WT=-63cm

4.3.2 Análisis de sensibilidad

Para estudiar en la mejor manera posible los efectos que tienen el ángulo de fricción y el nivel freático en la superficie de rotura, se decidió realizar un análisis de sensibilidad del ángulo de rozamiento en función de los niveles freáticos relevantes, que se habían obtenido anteriormente a partir de la distribución normal con los datos del piezómetro.

En los ensayos se determinó un ángulo de fricción residual de $14,4^\circ$ y un ángulo de fricción de $29,5^\circ$ en el caso de la muestra en condiciones no residuales. Por ello, estos dos ángulos de fricción fueron estudiados con mayor detenimiento.

VALORES NIVEL FREÁTICO	
WT 1	SECO
WT 2	-136,9 cm
WT 3	-103,4 cm
WT 4	-62,7 cm
WT 5	SATURADO

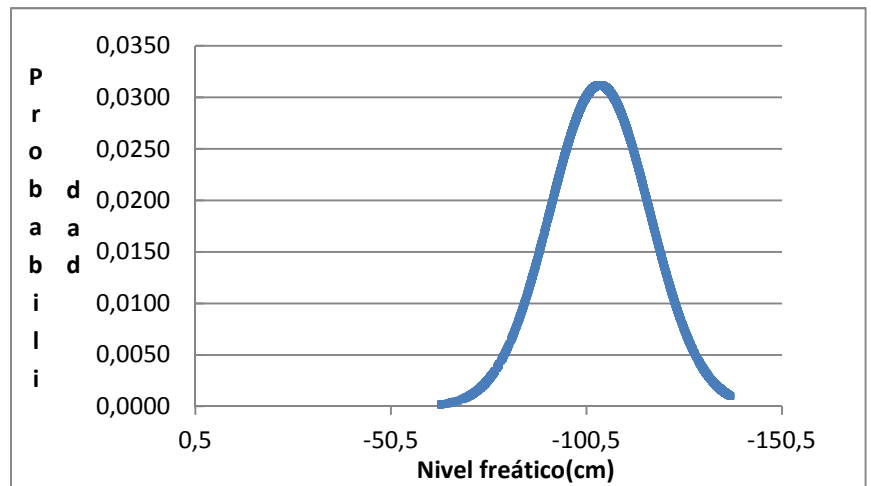


Fig.28: Tabla de valores significativos del nivel freático y distribución normal datos piezómetro. Relación probabilidad-nivel freático en cm

En la Tabla 2 se resume el análisis de sensibilidad. El procedimiento del análisis se realizó a partir de los cuatro valores del ángulo de fricción residual que se eligieron como más relevantes, y a partir de aquí se fue modificando el valor del nivel freático, a la vez que se observaba la evolución del factor de seguridad.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD							
ÁNGULO DE FRICCIÓN 1		ÁNGULO DE FRICCIÓN 2		ÁNGULO DE FRICCIÓN 3		ÁNGULO DE FRICCIÓN 4	
14,4°		15°		18°		29,5°	
NIVEL FREÁTICO	F S	NIVEL FREÁTICO	F S	NIVEL FREÁTICO	F S	NIVEL FREÁTICO	F S
WT 1	1,159	WT 1	1,209	WT 1	1,466	WT 1	2,553
WT 2	1,159	WT 2	1,209	WT 2	1,466	WT 2	2,553
WT 3	1,102	WT 3	1,150	WT 3	1,394	WT 3	2,428
WT 4	0,938	WT 4	0,979	WT 4	1,187	WT 4	2,067
WT 5	0,571	WT 5	0,596	WT 5	0,723	WT 5	1,259

Tabla 2: Tabla resumen análisis de sensibilidad

A continuación se presentan los gráficos correspondientes al análisis de sensibilidad para los niveles freáticos seleccionados. En el eje de ordenadas tenemos el factor de seguridad según Bishop simplificado y en el de abscisas el ángulo de fricción.

Gráfico de sensibilidad para el nivel freático de -137 cm:

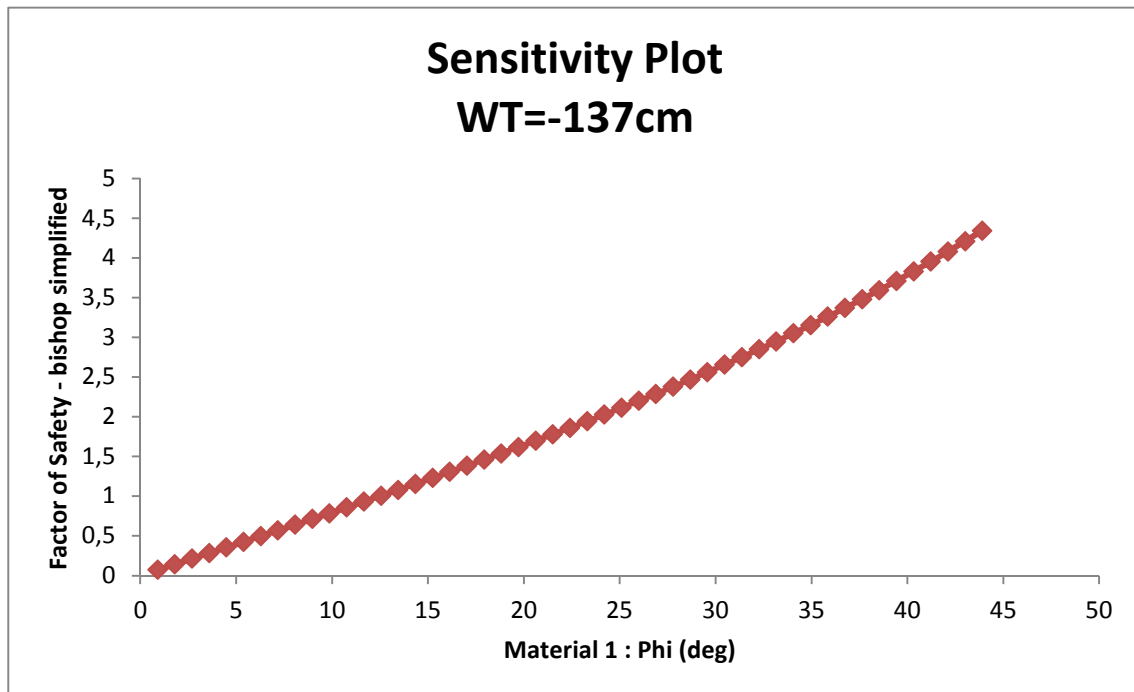


Fig.29: Gráfico de sensibilidad para WT=-137. Fuente: SLIDE

Gráfico de sensibilidad para un nivel freático de -103 cm:

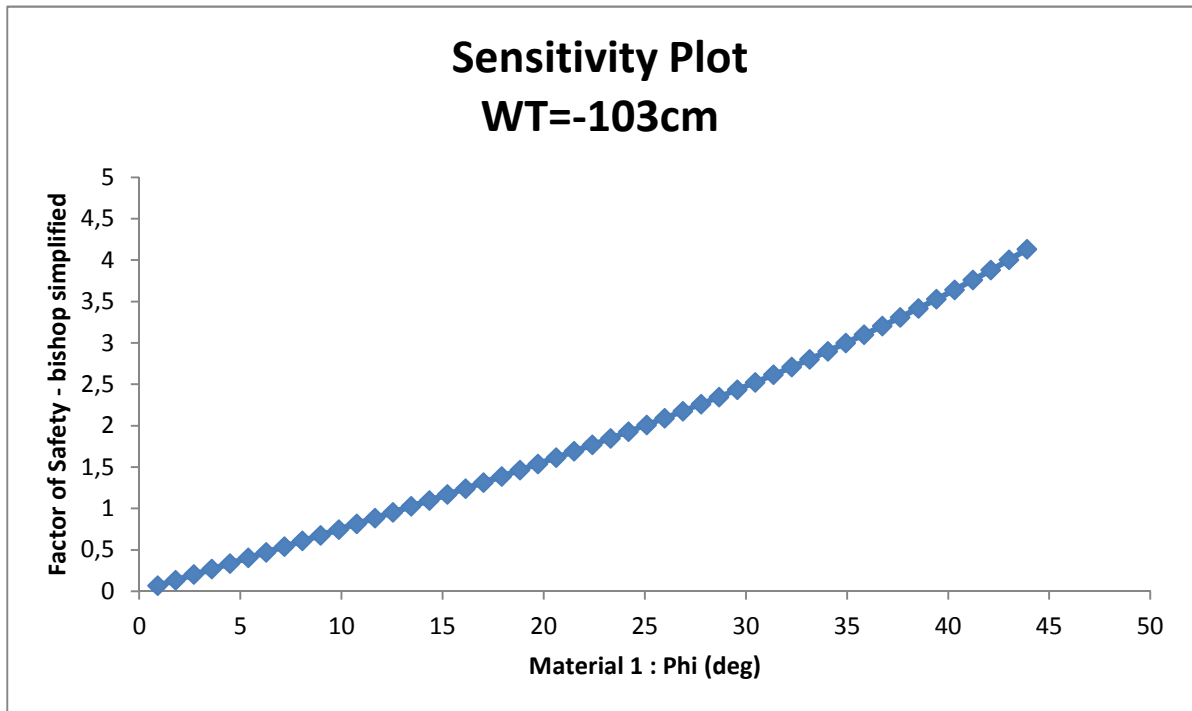


Fig.30: Gráfico de sensibilidad para WT=-103. Fuente: SLIDE

Gráfico de sensibilidad para un nivel freático de -63:

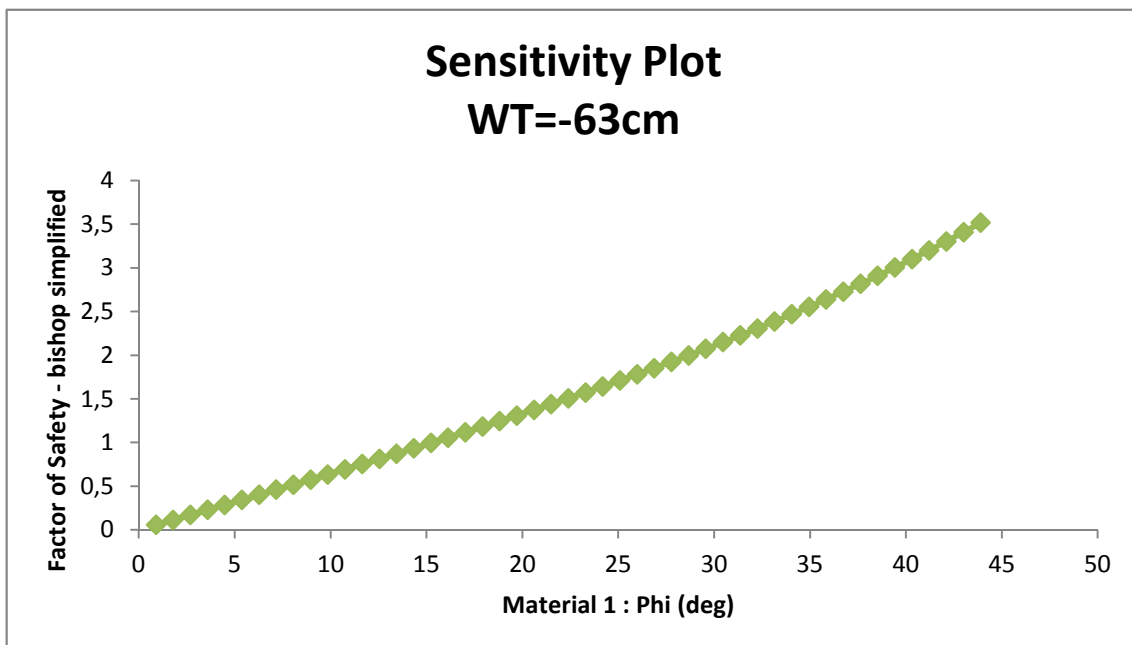


Fig.31: Gráfico de sensibilidad para WT=-63. Fuente: SLIDE

Si observamos la Fig.31 vemos como al ángulo de rozamiento de 15,23 grados le corresponde un factor de seguridad de 0,995, luego teniendo en cuenta que en este año el sensor de desplazamiento no midió ningún desplazamiento, el ángulo de fricción debe de ser ligeramente mayor a 15,23 grados.

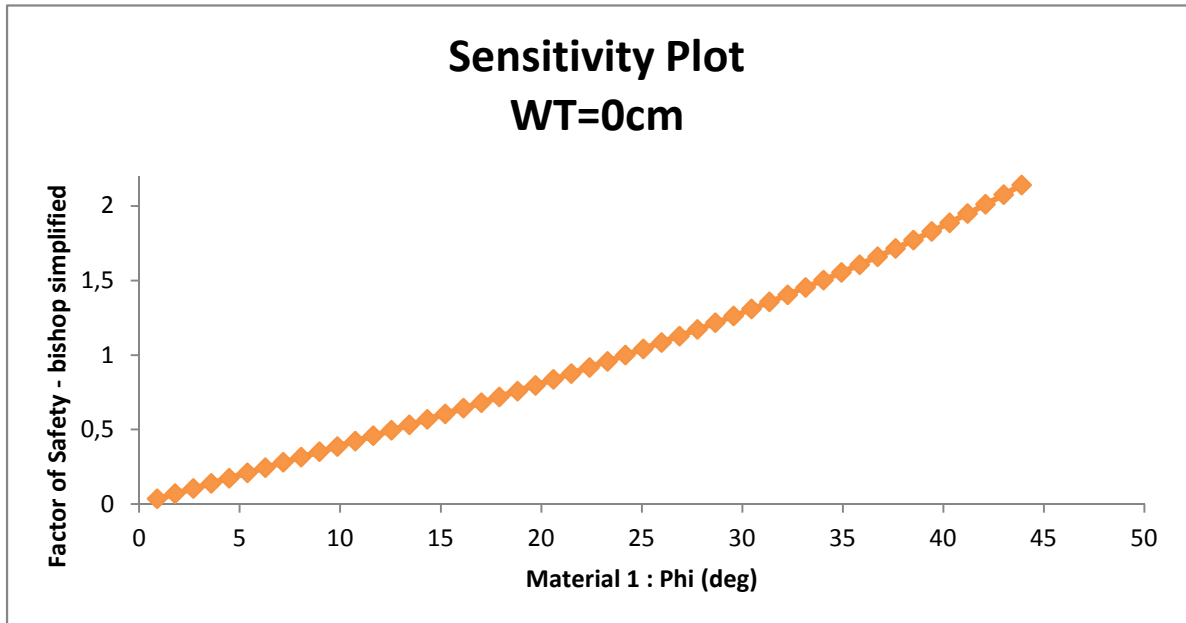


Fig.32: Gráfico de sensibilidad para el caso totalmente saturado. Fuente: SLIDE

Resumen análisis de sensibilidad:

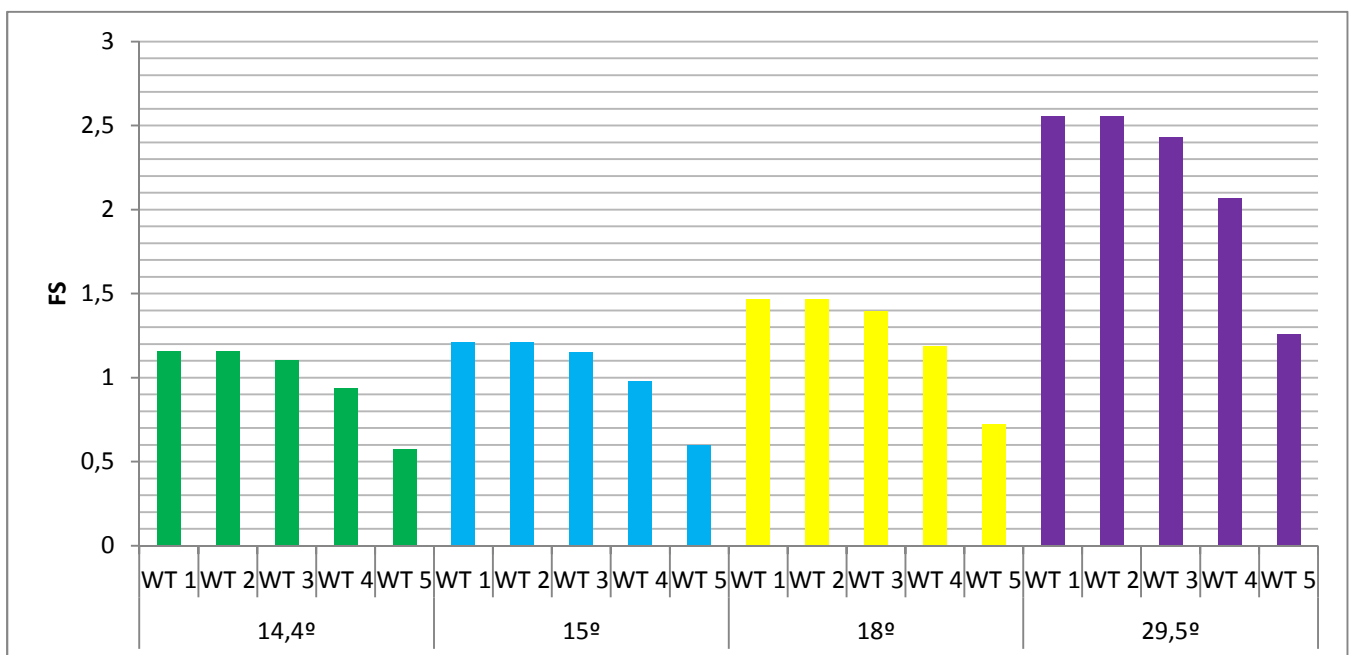


Fig.33: Gráfico resumen para el análisis de sensibilidad

En la Fig.33 podemos ver la evolución del factor de seguridad en función del nivel freático y de los cuatro valores del ángulo de fricción que fueron seleccionados. Mediante este gráfico resumen podemos observar la no linealidad del FS en función del nivel freático y del ángulo de fricción, como ya se podía observar en la fórmula del FS del método de Bishop simplificado.

Además, se puede observar, para cada ángulo de fricción, en qué intervalo de valores se encuentra el valor crítico del nivel freático, a partir del cual el FS pasa a ser igual o menor que 1. En el caso del ángulo de fricción de $29,5^\circ$ vemos como hasta para el caso totalmente saturado el factor de seguridad es superior a 1, concretamente de 1,259. En el caso del ángulo de fricción de 18° , el factor de seguridad solo es inferior a 1 (0,723) en el caso totalmente saturado.

En el caso de los ángulos de fricción de 15° y $14,4^\circ$ vemos como en el caso del WT4 el factor de seguridad es inferior a 1. Esto nos indica, según los datos registrados por el sensor de desplazamiento, que el ángulo de fricción debe ser necesariamente superior a 15° .

A modo de cota inferior y según ya se ha comentado anteriormente podemos tomar como valor del ángulo residual $15,23^\circ$, que es el valor mínimo del ángulo residual, al que le corresponde un FS igual o mayor que 1, para el nivel freático máximo registrado en 2014. Procediendo de este modo, nos encontraremos del lado de la seguridad.

5. Conclusiones

Después de una búsqueda del estado del arte e información general sobre deslizamientos y un estudio concreto de nuestro caso, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

El deslizamiento de la localidad de Cercs en el Berguedà es un deslizamiento translacional con una superficie de rotura preexistente que se encuentra aproximadamente 1 m por debajo de la superficie del terreno.

Su geología se caracteriza principalmente por la presencia de argilitas, lo que nos permite analizar mediante un estudio de sensibilidad en qué condiciones resistentes se encuentra su superficie de rotura. Debido a la capacidad de reorientación de las partículas, el ángulo de fricción en la zona de la superficie de rotura preexistente tiene un valor muy próximo al de las condiciones residuales.

A partir del análisis de sensibilidad y de los datos registrados por el sensor de desplazamiento se llega a la conclusión de que el valor del ángulo residual es aproximadamente de $15,23^\circ$.

Este ángulo de fricción fue determinado a partir de los datos piezométricos de 2014.

Observando la variación del factor de seguridad del deslizamiento en función del nivel freático, se puede llegar a la conclusión de que en posibles episodios intensos de lluvia y con una consiguiente infiltración del agua, se podría llegar a niveles freáticos tales que podrían reactivar la superficie preexistente de rotura.

Una buena medida previsoría podría ser un control exhaustivo del nivel piezométrico.

6. Bibliografía

- “Curso de Geotecnia para infraestructuras” Sevilla 2004. Luís Ortuño Abad. Profesor Asociado. ETSICCP.UPM
- “Apuntes”. Grupo de Geotecnia. Universidad de Cantabria.
- “Apuntes de clase” Departament de Geotecnia. ETSECCPB.
- <https://www.roscience.com/products/8/Slide>
- <https://wikipedia.org>
- “Geotecnia en suelos no saturados” de Alfaro Soto, MA
- “Landslide Clasification”.1978. Varnes
- “Análisis y mecanismos de rotura en taludes en suelos”1999. Claudio Olalla
- <https://www.icc.cat>
- “Lab Data”. Consultora GEOMAR